


扫码阅读下载
孙东玲,曹偈,杨慧明,等.陕西侏罗纪煤层瓦斯灾害特点及突出发生条件的探讨[J].矿业安全与环保,2024,51(3):1-7.
SUN Dongling,CAO Jie,YANG Huiming,et al. Discussion on characteristics and outburst conditions of Jurassic coal seam gas disaster in Shaanxi Province[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(3):1-7.
DOI: 10. 19835/j. issn. 1008-4495. 20240561

"煤矿瓦斯灾害发生机理与防控"专题

陕西侏罗纪煤层瓦斯灾害特点及突出发生条件的探讨

孙东玲[1,2],曹 偈[1,2],杨慧明[1,2],唐 强[1,2]
(1.煤矿灾害防控全国重点实验室,重庆 400037;2.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

摘要:随着我国煤炭生产向西部转移,西部尤其是西北地区大量开采低阶煤的矿井瓦斯灾害,成为必须认真面对的重要问题。以陕西黄陇侏罗纪煤田黄陵矿区、旬耀矿区、永陇矿区的6个典型矿井为研究对象,分析总结了矿井瓦斯赋存特征,并从煤层突出危险性单指标、能量、突出动力效应等多个角度探讨了煤层突出危险性。研究表明:黄陇煤田以低变质烟煤为主,煤的破坏程度小、硬度较高,煤层瓦斯普遍呈现高压力、低含量(1.71~4.36 m^3/t)特征;较低的瓦斯含量使煤层中孕育的瓦斯内能连同弹性潜能低于煤体破碎并抛掷做功所需要的能量值,也不能产生足够多的气体裹挟煤炭在巷道空间运移形成典型的突出灾害;但发生片帮或冲击地压等动力现象时短时间内的大量瓦斯涌出将成为这些矿井主要的瓦斯事故风险。指出陕西侏罗纪煤田的矿井应在做好瓦斯抽采的同时,通过控制好煤壁顶板和冲击地压将能有效减少瓦斯事故的发生。

关键词:侏罗纪煤层;瓦斯地质;瓦斯参数;煤与瓦斯突出;发生条件
中图分类号:TD713.1　**文献标志码**:A　**文章编号**:1008-4495(2024)03-0001-07

Discussion on characteristics and outburst conditions of Jurassic coal seam gas disaster in Shaanxi Province

SUN Dongling[1,2],CAO Jie[1,2],YANG Huiming[1,2],TANG Qiang[1,2]
(*1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control,Chongqing 400037,China;*
2. CCTEG Chongqing Research Institute,Chongqing 400037,China)

Abstract:With the transfer of coal production to the west of China,the coal mine gas disaster in the west,especially in the northwest,has become an important problem that must be faced seriously. Taking 6 typical mines in Huangling,Xunyao and Yonglong mining area of Jurassic coal field of Huanglong,Shaanxi Province as the research objects,the characteristics of coal mine gas occurrence were analyzed and summarized,and the coal seam outburst risk was discussed from the aspects of single index,energy and dynamic effect of coal seam outburst risk. The main conclusions are as follows: the coal in Huanglong coalfield is mainly low-metamorphic bituminous coal,with small degree of coal destruction and relatively high hardness. The gas of the coal seam showing obvious characteristics of high pressure and low content (from 1.71 m^3/t to 4.36 m^3/t). Due to the low gas content,the gas potential energy and elastic internal energy in the coal seam lower than the energy value required for coal crushing and throwing to do work,and are not enough to complete the transportation of outburst coal in the roadway space to form a typical outburst disaster. However,a large amount of gas gushing out in a short time will become the main gas accident risk in these mines when dynamic phenomena such as sheet wall or rock burst occur.

收稿日期:2024-05-30;2024-06-19修订
基金项目:国家自然科学基金项目(52274246);重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1149)
作者简介:孙东玲(1963—),男,山东聊城人,研究员,博士研究生导师,全国能源化学系统"大国工匠",中国煤炭科工集团首席科学家,主要从事瓦斯灾害防控方面的研究工作。E-mail:cqsdl@sina.com。

It is pointed out that the coal wall roof and rock burst should be controlled at the same time of gas extraction in the Jurassic coal field of Shaanxi Province, which can effectively reduce the occurrence of gas accidents.

Keywords: Jurassic coal seams; gas geology; gas parameter; coal and gas outburst; occurrence condition

我国探明的煤炭资源量为 20 244.73 亿 t，预测资源量为 38 796.12 亿 t[1]。预测资源量最多的是侏罗纪煤系，占全国预测资源量的 64.7%，且分布范围广，包括西北的五省（自治区）及华北、东北大部[2]。在已探明的侏罗纪煤储量中，低变质烟煤占据了相当大的比例，中生界侏罗纪低阶煤储量约占全国低阶煤储量的 4/5。通常情况下，低阶煤属于未变质煤或者低变质煤，生烃能力较差，导致瓦斯含量相对较低。此外，低阶煤的孔隙率大于高阶煤，而且孔隙中吸附能力强的微孔隙少于高阶煤，使其吸附能力低，游离气含量占比较高，且在同样的气体含量下显现的瓦斯压力更高。近年来，随着煤矿产能和开采深度增大，陕西黄陇煤田、甘肃窑街煤田、辽宁铁法矿区等多个低阶煤矿区高瓦斯矿井逐年增多，部分低阶煤矿区发生了瓦斯事故[3-7]。低阶煤高瓦斯矿井的增多成为我国煤矿瓦斯灾害防控面临的新问题。

陕西拥有神府东胜煤田的南半部和黄陇煤田两大侏罗纪煤基地[8]，占陕西煤炭探明储量的 91%。根据最新公布的我国灾害严重生产煤矿名单[9]，陕西省目前有 32 处高瓦斯矿井，分布在黄陇侏罗纪煤田的就有 29 处，占比高达 90.6%；灾害情况往往较为复杂，同时具有冲击地压灾害的矿井有 24 处，具有水文地质类型复杂情况的矿井 14 处。

黄陇侏罗纪煤田位于鄂尔多斯盆地西南缘，是国家重点发展的 14 个大型煤炭基地之一——黄陇基地的重要组成部分。自东北向西南分为黄陵矿区、焦坪矿区、旬耀矿区、彬长矿区和永陇矿区[8]。与其他侏罗纪煤田相同，煤阶以低阶煤为主，具有变质程度低、瓦斯含量低、丰度低、游离气含量高的特点，致使瓦斯赋存特征有别于中高阶煤。另外，侏罗纪煤的成煤时代晚，经历的地质构造运动期次少，煤体结构以原生结构为主、煤层裂隙发育，煤层具有渗透性好、瓦斯流动性强的特点，导致低阶煤瓦斯涌出特征有别于中高阶煤[10-12]。在参与黄陵、旬耀、永陇等矿区瓦斯灾害防治技术工作中，发现这些侏罗纪低阶煤田的瓦斯赋存及突出灾害属性特点与主流高瓦斯突出矿井的石炭二叠纪等中高阶煤田有很大的不同，有必要重新思考不同煤田条件下的突出灾害发生条件，以便在我国煤炭生产重心西移的时代能够更好地做好煤矿瓦斯防治工作。

1 典型矿井瓦斯地质概况

1.1 瓦斯地质条件

黄陇煤田内的含煤地层位于侏罗纪延安组第一段（J_2y^1）中上部，煤田内不同矿区的瓦斯地质条件略有差异。

黄陵矿区地处鄂尔多斯盆地陕北斜坡南缘，总体构造格架是一个具有波状起伏、倾向北西的单斜构造，地层倾角 1°～5°，局部达 7°～15°，未发现较大断层及岩浆岩，属构造简单类型。侏罗统延安组是本区的含煤地层，2 号煤为矿区内主要可采煤层。煤层赋存较稳定，结构属简单—较复杂类型，煤质硬脆，开采深度一般 500～600 m，最深达 800 m。矿区内黄陵一号煤矿（HL1），煤厚 0～5.56 m，平均厚 2.02 m，煤层镜质组最大反射率平均值为 0.788%；黄陵二号煤矿（HL2）煤层埋深 165～740 m，可采厚度 0.80～6.48 m，平均 3.41 m，属中厚—厚煤层，厚度变化较大但规律性明显，煤层镜质组最大反射率平均值为 0.760%；党家河煤矿（DJH）2 号煤层埋深 372～800 m，一般 500～600 m，可采煤层厚度 0.80～2.96 m，平均 1.65 m，属稳定的薄—中厚煤层，镜质组最大反射率介于 0.865%～0.867%。本区 2 号煤层属Ⅱ变质阶段的烟煤，即弱黏煤—气煤范畴。南部及东南部为 N_2-CH_4 带，其他区域均为 CO_2-N_2 带，干燥无灰基煤的瓦斯含量 0.10～2.68 mL/g，平均 0.59 mL/g。黄陵矿区煤、油、气共存，存在 6 个连续展布油气储集层，油型气赋存主要受地质构造、储层埋深和岩性等因素控制。矿井井田地勘及生产过程均存在围岩层油气涌出及喷出现象，瓦斯、油气赋存规律复杂。

旬耀矿区的照金煤矿（ZJ），主要可采煤层为 4^{-2} 煤层，井田南翼煤层倾角 8°～12°，北翼煤层倾角 2°～5°，煤厚 0～16.4 m，平均 9.21 m。矿井为一宽缓的向斜构造，轴向近东西。未见断裂和岩浆活动迹象，井田边缘侏罗系部分地层沉积缺失，构造属中等类型。在掘进和工作面回采过程中，揭露了较多的节理和小型断层构造，均为正断层，落差小于 5 m。煤层镜煤最大反射率介于 0.48%～0.75%，属Ⅰ变质阶段的烟煤，即长焰煤—不黏煤范畴。煤层自然瓦斯成分以 N_2 和 CH_4 为主，CO_2 等较少。测试干燥无灰基煤的瓦斯含量为 0.06～1.03 mL/g，大部

分低于 1.0 mL/g,煤层整体处于瓦斯风化带。

永陇矿区位于鄂尔多斯盆地南部渭北挠褶带北缘。矿区内的园子沟煤矿(YZG),可采煤层共 4 层,2^{-1} 煤层厚度 0~13.30 m,平均厚度 3.62 m。以不黏煤为主,长焰煤次之。含煤区位于背向斜组合的构造地带,褶皱较为宽缓,未发现断距大于 30 m 的断层,构造复杂程度为简单—较复杂类型。地勘时期干燥无灰基煤的瓦斯含量相对较小,2^{-1} 煤平均为 1.10 mL/g。郭家河煤矿的主采煤层为 3 煤层,大部分区域煤层倾角小于 6°,煤层厚度 0.55~26.83 m,平均厚 11.57 m。煤层为低变质烟煤,煤类为不黏煤。井田以发育宽缓的褶曲为主,含煤地层沿走向、倾向的产状变化不大,无岩浆活动影响,地质构造中等。

1.2　瓦斯参数

收集获得了研究矿井主采煤层的 11 组瓦斯参数,如表 1 所示。其中,位于黄陵矿区的黄陵一矿的绝对瓦斯涌出量最高,达 152.38 m^3/min;黄陵二矿的绝对瓦斯涌出量也接近 100 m^3/min。同时,调查发现,党家河煤矿 2016、2018 年的瓦斯等级鉴定结果为低瓦斯矿井,到 2020 年后升级为高瓦斯矿井;位于旬耀矿区的照金煤矿瓦斯等级具有相同情况,2015 年鉴定为瓦斯矿井,2017 年之后升级为高瓦斯矿井。

表 1　矿井主采煤层瓦斯参数

Table 1　Gas parameters of main coal seam of mine

矿区名称	矿井编号	矿井绝对瓦斯涌出量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	煤层编号	盘区编号	瓦斯压力 p/MPa	瓦斯含量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	残存瓦斯含量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	瓦斯放散初速度 ΔP	瓦斯吸附常数 a/($m^3 \cdot t^{-1}$)	瓦斯吸附常数 b/MPa^{-1}
黄陵矿区	HL1	152.38	2	八	0.15	2.00~2.50		10~16	17.21~22.49	1.03~1.21
				六	0.44	2.50~3.10		12~15	16.12~18.38	0.98~1.31
				十	1.19	3.30~3.90		8~17	16.54~18.47	1.04~1.32
	HL2	99.21	2	三	0.40	2.54~2.58	0.66~0.74	11~20	17.77	0.94
				四	0.38	1.71~4.33	0.45~0.57	11~16	18.75	1.03
				二	0.88	4.32	0.91	10~15	16.25	1.17
	DJH	CH_4 26.88,CO_2 8.26	2	Ⅱ	0.70	2.42~4.36	1.21	10~12	19.00	0.87
旬耀矿区	ZJ	15.84	4^{-2}		0.77			10~17	23.06~28.76	0.83~0.99
永陇矿区	YZG	55.97	2^{-1}	102	1.09	2.39~3.66	0.95	16~29	24.60~30.22	0.74~0.93
	GJH	CH_4 36.51,CO_2 6.54	3	Ⅱ	0.54	2.10~2.40	1.05	22	27.91	1.07
				Ⅱ	0.60	2.61~3.53	0.98~1.18	19~27	25.52~29.62	0.86~1.09

区内煤层瓦斯压力为 0.15~1.19 MPa,平均为 0.65 MPa,但有矿井未经确认的瓦斯压力最高达 1.78 MPa。瓦斯含量为 1.71~4.36 m^3/t,略高于地勘时期瓦斯钻孔煤心解吸数据。瓦斯残存比例普遍较高,最高达 50%(DJH、GJH)。煤层的瓦斯放散初速度 ΔP 为 8~29,所有煤层最大 ΔP>10,永陇矿区的煤层瓦斯放散初速度(16~29)显著大于其他矿区(<20)。而根据瓦斯吸附常数数据可知,黄陵矿区煤层瓦斯吸附常数 a <20 m^3/t,说明其瓦斯吸附能力较低;旬耀与永陇矿区煤层瓦斯吸附常数 a 为 23.06~30.22 m^3/t,说明瓦斯吸附能力较强。吸附常数 b 为 0.74~1.32 MPa^{-1}。而兰氏压力 $p_L(1/b)$ 为 0.76~1.35 MPa,兰氏压力偏低,呈现出瓦斯不易解吸的特点。

1.3　煤层瓦斯赋存特点

上述典型矿井的煤层瓦斯含量为 1.71~4.36 m^3/t,普遍较低。这与其变质程度低、生烃量少有关。表现在矿井瓦斯涌出量方面,有些矿井尽管产量大,矿井绝对瓦斯涌出量最大也达到了 152.38 m^3/min,介于 15.84~152.38 m^3/min,但矿井相对瓦斯涌出量均在 10 m^3/t 以下,为 4.59~9.02 m^3/t,均应属于低瓦斯矿井。但其中的高产矿井由于绝对瓦斯涌出量较大而升级为高瓦斯矿井。

这些矿井的另一项瓦斯参数——煤层瓦斯压力指标,却显示出较高的数值。研究的 6 对矿井中,煤层瓦斯压力最大值都在 0.60 MPa 以上,其中 2 对矿井超过了 1.00 MPa,甚至未去除油气影响的压力值最大达到了 1.78 MPa。这显示低阶煤普遍具有高瓦斯压力、低瓦斯含量的特征。

分析出现这一情况的原因,可能有多种因素:一是煤层变质程度低,微孔隙少,吸附能力弱,在与中高阶煤相同的含量时有更多的瓦斯处于游离状态,从而显现出更高的瓦斯压力;二是煤层中水分普遍

较高,同样的物理结构下煤层吸附瓦斯的能力进一步减弱,处于游离状态的瓦斯量增大,煤孔隙内显现的瓦斯压力更大。

2 陕西侏罗纪煤层突出危险性分析

鉴于这些矿井瓦斯压力普遍较高,而瓦斯压力是突出矿井鉴定最重要的指标,所以,有必要确定其是否具有突出危险性,从而决定是否必须采取防突技术措施,保障煤矿安全生产。

2.1 从煤层突出危险性单指标分析

所研究矿井主采煤层突出危险性单指标(破坏类型、瓦斯放散初速度 Δp、煤的坚固性系数 f、瓦斯压力 p 等)测试结果见表2。

表2 煤层突出危险性单指标测试结果
Table 2 Single index test results of coal seam outburst risk

矿井编号	煤层编号	盘区编号	测试地点埋深/m	破坏类型	ΔP_{max}	f_{min}	p_{max}/MPa
HL1	2	八	268.00~495.72	Ⅰ~Ⅱ	15	0.98	0.44
		六	349.76~500.60	Ⅰ~Ⅱ	17	0.85	1.19
		十	247.12~443.56	Ⅰ~Ⅱ	20	0.85	0.40
HL2	2	三	609.60~671.60	Ⅰ~Ⅱ	16	0.92	0.38
		四	428.60~563.60	Ⅰ~Ⅱ	15	0.99	0.88
		二	399.60~551.50	Ⅰ~Ⅱ	12	0.90	0.70
DJH	2	Ⅱ	459.93~624.60	Ⅰ~Ⅱ	12	0.64	0.70
ZJ	4^{-2}		462.70~674.30	Ⅱ~Ⅲ	17	0.68	0.77
YZG	2^{-1}	102	555.00~734.00	Ⅱ	29	0.91	1.09
GJH	3	Ⅰ	596.81~757.48	Ⅰ~Ⅱ	22	0.63	0.54
		Ⅱ	416.40~660.63	Ⅰ~Ⅱ	27	0.59	0.60

由表2可以看出,煤的瓦斯放散初速度 ΔP 都超过了具有突出危险的临界值。但煤层的破坏程度普遍较低,只有照金煤矿(ZJ)达到了具有突出危险的Ⅲ类破坏程度,其他煤矿均为不具有突出危险的Ⅱ类破坏类型。从瓦斯压力 p 看,如黄陵一矿、二矿(HL1、HL2),园子沟矿(YZG)等半数矿井超过了临界值;但由于煤的坚固性系数 f 普遍较大,均属于超过0.5的无突出危险范围,而根据《煤矿瓦斯等级鉴定办法》(2018),更大的坚固性系数对应更高的瓦斯压力临界值。综上所述,这些矿井的煤层瓦斯压力值对应于其煤的硬度而言,均可判定为无突出危险性。此外,在测压钻孔施工过程中未发现喷孔、顶钻等明显突出预兆。

因此,尽管多数矿井瓦斯压力数值较高,但根据有关法规,仍可判定为无突出危险矿井。

2.2 从能量角度分析

从能量角度出发,突出过程实际上是能量的积聚和释放过程,是能量形式的转换。突出煤的运移与破碎是该过程能量耗散的主要方式。考虑到煤与瓦斯突出是在瞬间发生的,整个瓦斯膨胀过程很短,可近似认为是绝热过程,得到以下能量关系模型[13-16]:

$$\begin{cases} W_1+W_2=A_1+A_2 \\ W_1=1000\cdot\dfrac{3(1-2\mu)}{2E}\sigma_0^2V_0 \\ W_2=W_d+W_f=(V_d+V_f)\dfrac{p_0}{n-1}\left[\left(\dfrac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right] \\ A_1=46.914f^{1.437}Y_{p1}^{1.679}B \\ A_2=\dfrac{BgL_p^2}{2h},L_p=\dfrac{1}{B}\int x\mathrm{d}m \end{cases} \tag{1}$$

式中:W_1 为突出煤岩弹性能,kJ;W_2 为瓦斯内能,由吸附瓦斯解吸产生的解吸瓦斯膨胀能 W_d 及游离瓦斯膨胀能 W_f 构成,kJ;A_1 为破碎功,kJ;A_2 为抛出功,kJ;μ 为煤体的泊松比;E 为煤体的弹性模量,MPa;σ_0 为煤层原始状态下垂直应力,MPa;V_0 为能量释放区体积,m^3;V_d、V_f 分别为参与突出做功的解吸瓦斯与游离瓦斯体积(p_0 状态下),m^3;p_0 为突出后气体压力,MPa;p_1 为突出时的初始气体压力,MPa;n 为气体状态参数;f 为煤的坚固性系数;Y_{p1} 为破碎成粒径0.2 mm以下煤样质量占总煤样质量的百分比,%;B 为突出煤炭质量,t;g 为重力加速度,取9.8 N/kg;h 为巷道内直径,m;L_p 为与突出口的等效距离,m;x 为突出煤与突出出口的距离,m;dm 为巷道单位长度内的突出煤质量,kg。

通过近年来实验研究表明,仅游离瓦斯量无法提供煤体抛出或破碎的全部能量[17-18]。胡千庭等[19]给出了参与突出做功瓦斯量与游离瓦斯量的比值系数;TU 等[20]考虑了参与做功的瓦斯量与煤的粒度、扩散系数等之间的关系,由极短突出时间内煤颗粒中瓦斯解吸量与瓦斯极限解吸量的关系推导出参与突出做功瓦斯量的计算方法;CAO 等[21]由实验结果分析得到,参与做功的吸附瓦斯量与瓦斯含量或游离瓦斯量的比值并非常量,其与瓦斯压力呈指数函数关系。分析其原因是不同气体压力条件下,突出煤的破碎程度不同[22],突出煤粉的运移规律也不同。随瓦斯压力增大,能量的转化效率提高,破碎程度增加,表现为突出后等效粒径减小,比表面积增大。而比表面积的增大,反过来促进瓦斯解吸量增加,参与突出做功的瓦斯量增加。

因此,将表1、表2中黄陇矿区各参数平均值作

为计算依据,根据公式(1)可计算得到埋深 250~1 000 m、f 值为 0.3~1.2、孔隙率为 3%~13%,以及瓦斯压力为 0.45~1.20 MPa 条件下突出发生的瓦斯含量临界值,如图 1 所示。

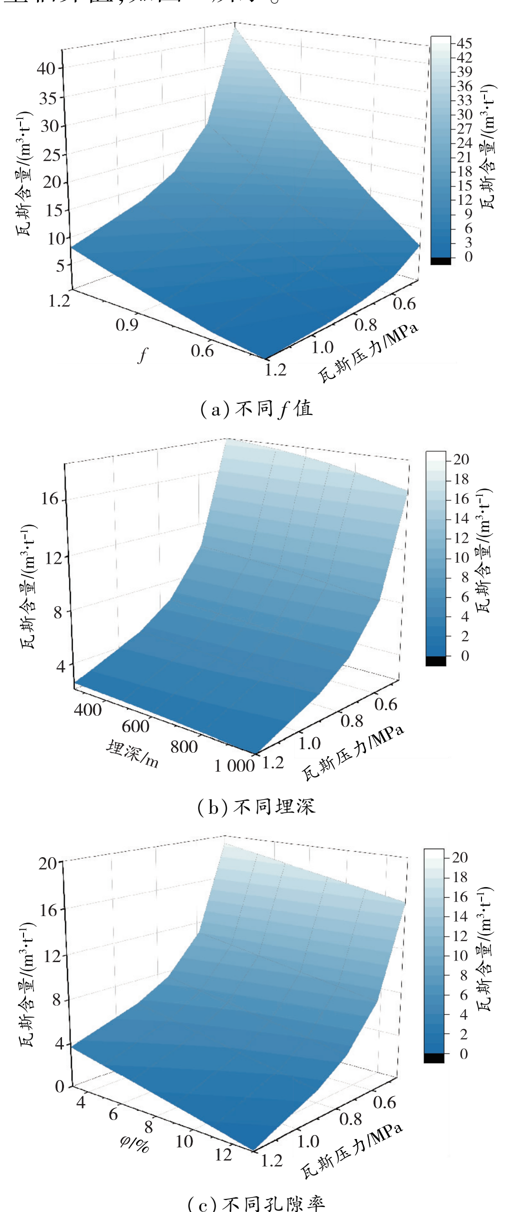


图 1　不同条件下突出发生的临界瓦斯含量与压力关系

Fig. 1　Relationship between critical gas content and pressure for outburst under different conditions

由图 1 可以看出,黄陇矿区的煤层瓦斯含量均在能发生突出的临界值以下,也就是说,在黄陇矿区有关矿井目前的瓦斯赋存条件下,尽管有的矿井瓦斯压力达到了较高的数值,但仍不具备发生突出的条件。

需要指出的是,突出发生所需的最低瓦斯含量随瓦斯压力的增大而降低,同时随 f 值的增大而显著增大,随埋深与孔隙率的增加而减小。这是由于根据新表面说,煤岩破碎所消耗的功与破碎后产生的新增表面积成正比,而相关学者研究表明,破碎比功与 f 值成正比[23],当 f 值增大时,煤体要破碎成相同粒径所需的能量显著增加。而随埋深的增大,应力增大,煤体所孕育的弹性能增大;随孔隙率增高,游离瓦斯做功量增大,突出时所需要的解吸瓦斯膨胀能 W_d 减小,发生突出的临界瓦斯含量值相应减小。因此,当煤层埋深增加 f 值显著减小时,应重新评估突出发生的可能性。

2.3　从突出动力效应角度分析

煤与瓦斯突出时的典型动力效应特征是短时间内抛出大量的破碎煤岩,并在采掘空间中运移和堆积。典型突出事故煤岩的抛掷距离可达到几百米,甚至上千米。突出孔洞内的煤炭破碎和孔洞口外的短距离位移还可以由煤体弹性能完成,但在巷道内几十米到几百米的煤炭运移则只能是大量瓦斯气体的动力作用结果。突出激发后,突出煤粒被持续高速涌出的瓦斯裹挟着向采掘空间抛出、运移,即突出煤—瓦斯两相流[24]。根据研究可知,突出煤颗粒的运移包括加速、平衡减速及沉降等运动阶段,综合固体颗粒在气流中的悬浮运动机理和能量守恒定律,可获得一维状态下突出煤在巷道中的运移数学模型。通过模型计算可知,突出煤颗粒运移距离随突出初始瓦斯气流速度的增大基本呈线性增大趋势[25],如图 2 所示。

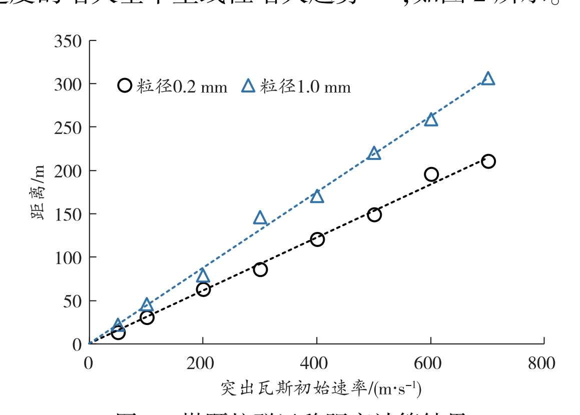


图 2　煤颗粒群运移距离计算结果

Fig. 2　Calculation results of coal particle group migration distance

突出过程中的涌出瓦斯主要是抛出煤体及突出孔洞壁附近煤体的涌出瓦斯。将突出孔洞假设为单椭球体,突出煤的瓦斯解吸速率随时间变化规律可用文特式描述,突出时间一般持续几秒到几十秒,在突出时间内瓦斯涌出量 q 可由式(2)表述[19]:

$$q=\frac{6Bv_1}{t_0^2}\left[\frac{t-t^2/t_0}{K_\alpha-1}-\frac{(t+1)^{2-K_\alpha}-(1-2t/t_0)}{(K_\alpha-1)(2-K_\alpha)}+\frac{2(t+1)^{3-K_\alpha}-2}{(K_\alpha-1)(2-K_\alpha)(3-K_\alpha)t_0}\right] \tag{2}$$

式中:v_1 为煤样初始时刻的瓦斯解吸速度,$cm^3/(g·s)$;

t_0 为突出持续时间,s;t 为突出持续的某一时间段,$t \leqslant t_0$,s;K_α 为煤粒瓦斯涌出的衰减系数。

假设黄陇矿区煤层具有突出危险性,并且发生了强度为 200 t 的突出,突出持续时间为 30 s,K_α = 1.075,v_1=0.5 $cm^3/(g \cdot s)$,巷道横断面尺寸 4 m×4 m。突出激发后随时间推移,突出煤逐渐在巷道内堆积,在靠近突出口位置快速形成吼道(见图 3),根据长期事故鉴定经验可知,吼道断面积一般为巷道断面积的 10%~30%;根据 1.2 小节分析,黄陇矿区瓦斯具有不易解吸的特点,并依据其瓦斯参数推算出不同突出时段能够参与的瓦斯量,据此计算在吼道断面积占比为 10%~30%时可实现的突出瓦斯初始速率,结果如图 4 所示。

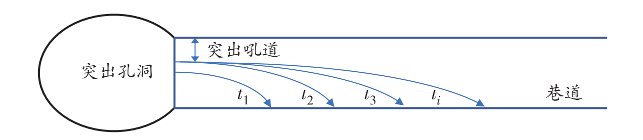


图 3　突出煤抛出过程
Fig. 3　The ejection process of outburst coal

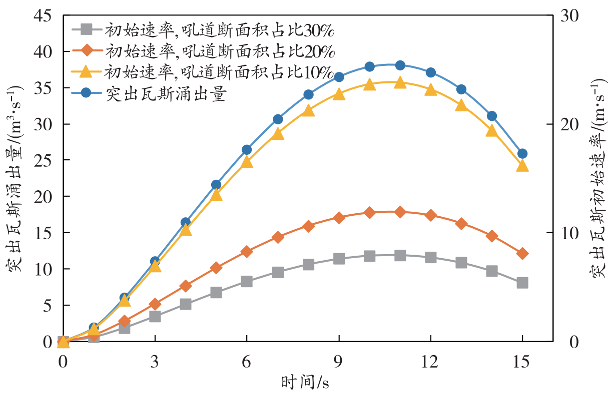


图 4　突出瓦斯涌出量与初始速率
Fig. 4　The amount and initial rate of outburst gas emission

由图 4 可见,在黄陇矿区瓦斯赋存条件下突出所能达到的瓦斯涌出初始速率最大为 23.8 m/s,结合图 2 可大致估算突出持续抛出煤粉的运移距离最大为 10.4 m,小于 200 t 煤炭在巷道的堆积长度,也就是说瓦斯气体量不足以完成对突出煤炭在巷道空间的搬运。因此,认为从突出动力效应角度分析,煤层的瓦斯赋存量不足以让矿井发生的动力现象呈现突出煤粉的抛出特征,不能发生典型的突出现象。

3　侏罗纪煤田煤层瓦斯灾害防治的建议

3.1　侏罗纪低阶煤瓦斯灾害特点

陕西侏罗纪煤田的瓦斯赋存具有以下特点:

1)与过去主要开采的石炭二叠纪煤田相比,陕西侏罗纪煤田经历的地质时期短、构造运动少,整体煤层结构相对完整、硬度高。

2)低阶煤变质程度低,生烃能力弱,再加上煤吸附瓦斯的能力较差,煤层瓦斯含量普遍较低。

3)由于低变质煤的吸附能力较差,而且煤的孔隙率比中高变质煤的孔隙率更大,其瓦斯含量中呈现吸附瓦斯量占比小、具有流动特性的游离瓦斯量占比较大的特征,从而显示出更高的瓦斯压力。

在这样的瓦斯赋存条件下,陕西侏罗纪煤田在瓦斯灾害及其防治方面将有以下特点:

a. 通常矿井的瓦斯涌出量较少,而高产高效矿井的绝对瓦斯涌出量虽然较大,但相对瓦斯涌出量仍处于较低水平。

b. 当出现片帮、冒顶等导致煤体松散、垮冒动力现象时,由于其游离瓦斯含量占比大,将更容易出现急剧、短时间内瓦斯大量涌出现象,易引发瓦斯超限事故。

c. 尽管煤层瓦斯压力并不低,有些甚至处于较高水平,但由于瓦斯含量低,瓦斯内能不足以支持典型突出的发生,动力现象发生时产生的气体量也不足以运移、抛掷煤炭,不会形成典型的突出灾害。但不排除个别矿井会发生压出、倾出等小规模动力灾害。

d. 由于低变质煤孔隙率普遍较高,而且游离瓦斯量占比大,煤层的渗透性、可抽性会更好,在瓦斯抽采方面应更重视预抽瓦斯措施的实施。

3.2　瓦斯防治建议

1)在对陕西侏罗纪煤田低变质、高压力、低含量的煤层瓦斯赋存特点及其致灾因素等进行研究后,得出了在当前地质、生产环境下不具有突出危险性的初步结论,这首先是基于对突出鉴定指标科学认识的一个重要变化和提升,即由单纯或主要依据瓦斯压力参数作为瓦斯指标进行突出鉴定,改进为通过综合分析瓦斯压力和瓦斯含量参数来进行突出危险性评价。这一初步结论,对于正确认识陕西侏罗纪乃至全国类似地质特点煤田的瓦斯灾害有指导意义。

2)对突出鉴定指标的这一改进或改变,还需要从理论上进行深入研究和完善,并在实践中不断验证。而且对陕西侏罗纪煤田瓦斯灾害特点的初步研究结论,仅是普遍意义上的认识和生产指导,具体各矿井个体差异很大,不能由此直接引申为对域内各矿的突出灾害进行定性。

3)该类矿井面临的瓦斯风险,将主要是采掘期间发生瓦斯动力现象引发瓦斯超限乃至爆炸事故,以及高产高效矿井开采工作面的瓦斯超限问题。由于游离瓦斯占比大、释放瓦斯快,瓦斯动力现象导致的短时间内高值瓦斯浓度超限,是不容忽视的风险点。应以预抽瓦斯为主,辅以边采边抽等卸压抽采措施,综合治理瓦斯。

4)应制订有效的抽采方式,并确定合理的抽采指标。矿井不能简单地采用防突效果检验的瓦斯含量指标和抽采达标法规相关的指标,而应以控制采掘工作面发生动力现象时的瓦斯超限程度和规模为目标,研究确定合理的瓦斯含量临界值。

5)顶板事故、冲击地压等动力灾害与瓦斯的协同防控,也是做好瓦斯防治的关键步骤。鉴于发生由瓦斯作用主导的煤与瓦斯突出的可能性较小,而重点是防控发生片帮冒顶和冲击地压等现象时大量涌出瓦斯造成的事故,因此,在做好瓦斯抽采的同时,控制好煤壁顶板和冲击地压将十分必要。黄陇侏罗纪煤田29处高瓦斯矿井中有24处同时具有冲击地压危险性。开展大区域煤层瓦斯抽采和卸压防控,释放应力,降低冲击能量,也可显著增高煤层渗透率、提高抽采效果。

4　结论

1)黄陇煤田内各矿区煤层赋存较稳定,以低变质阶段烟煤为主,煤的破坏程度小、硬度普遍较高,f值一般为0.6~1.0;煤层瓦斯含量低,一般为1.71~4.36 m^3/t,瓦斯残存比最高达50%,不易解吸;但煤层瓦斯压力相对较高,多在0.15~1.19 MPa,平均0.65 MPa。煤层瓦斯具有明显的高压力、低含量特征。

2)通过煤层突出危险性单指标及能量分析、动力效应分析等形式进行研究,认为尽管煤层瓦斯压力相对较高,但区内煤层破坏程度低、硬度大,尚不能达到有突出危险的程度;而在当前的地应力水平、煤结构特征条件下,瓦斯内能连同煤的弹性潜能尚未达到破碎并抛掷煤炭做功所需要的能量;另一方面,煤层瓦斯含量较低使得发生动力现象时产生的气体量不足以完成对抛出煤炭在巷道空间中的搬运而形成突出。这说明即便煤层的瓦斯压力较高,但煤层瓦斯含量很低,也将不具备发生突出的条件。

3)鉴于发生片帮冒顶和冲击地压等现象时短时间内大量瓦斯涌出是主要的瓦斯事故风险,因此,在做好瓦斯抽采的同时,控制好煤壁顶板和冲击地压也十分必要。

参考文献(References):

[1] 中国煤炭地质总局.中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M].北京:科学出版社,2016:226-227.

[2] 陈文敏,丁华,傅丛.中国中生代晚三叠世煤的资源分布与煤质特征[J].煤质技术,2021,36(1):27-35.
CHEN Wenmin,DING Hua,FU Cong. Resource distribution and coal quality characteristics of Mesozoic Late Triassic coal in China[J]. Coal Quality Technology,2021,36(1):27-35.

[3] 曾勇,柯妍,张鑫.低煤阶煤煤层瓦斯富集的地质因素研究[C]//基于瓦斯地质的煤矿瓦斯防治技术.徐州:中国矿业大学出版社,2009:67-71.

[4] 安秀煜.黄陇侏罗纪煤田瓦斯地质规律研究[D].西安:西安科技大学,2012.

[5] 李国君.铁法矿区瓦斯控制技术[J].中国煤层气,2005,2(1):29-32.
LI Guojun. Methane control technologies in Tiefa mining area[J]. China Coalbed Methane,2005,2(1):29-32.

[6] LIN B Q,LI H,YUAN D S,et al. Development and application of an efficient gas extraction model for low-rank high-gas coal beds[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(1):76-83.

[7] 蔺亚兵,秦勇,王兴,等.彬长低阶煤高瓦斯矿区瓦斯地质及其涌出特征[J].煤炭学报,2019,44(7):2151-2158.
LIN Yabing,QIN Yong,WANG Xing,et al. Geology and emission of mine gas in Binchang mining area with low rank coal and high mine gas[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(7):2151-2158.

[8] 陕西省发展和改革委员会,中国煤炭工业发展研究中心.关于陕西省推进煤炭工业持续健康发展管理办法的研究报告[R/OL].(2014-06)[2024-04-21]. http://www.ccsr.cn/Site/neiwang/Uploads/file/20170414/关于陕西省推进煤炭工业持续健康发展管理办法的研究报告.pdf.

[9] 国家矿山安全监察局.全国灾害严重生产煤矿名单[EB/OL].(2024-04-15)[2024-04-21]. https://www.chinaminesafety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/202404/t20240415_484910.shtml.

[10] 刘大锰,王颖晋,蔡益栋.低阶煤层气富集主控地质因素与成藏模式分析[J].煤炭科学技术,2018,46(6):1-8.
LIU Dameng,WANG Yingjin,CAI Yidong. Analysis of main geological controls on coalbed methane enrichment and accumulation patterns in low rank coals[J]. Coal Science and Technology,2018,46(6):1-8.

[11] 马安强,郭媛,宋战宏,等.彬长矿区瓦斯赋存及治理探讨[J].煤矿安全,2008,39(3):74-77.
MA Anqiang,GUO Yuan,SONG Zhanhong,et al. Discussion on gas occurrence and control in Binchang mining area[J]. Safety in Coal Mines,2008,39(3):74-77.

[12] 蔺亚兵,宋一民,蒋同昌,等.黄陇煤田永陇矿区煤层气成藏条件及主控因素研究[J].煤炭科学技术,2018,46(3):168-175.
LIN Yabing, SONG Yimin, JIANG Tongchang, et al. Study on forming conditions and main controlling factors of CBM reservoirs in Yonglong Mining Area of Huanglong Coalfield[J]. Coal Science and Technology,2018,46(3):168-175.

[13] 胡千庭.煤与瓦斯突出的力学作用机制及应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2007.
HU Qianting. Study on the mechanical mechanism of coal and gas outburst and its application[D]. Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing),2007.

[14] 李成武,解北京,曹家琳,等.煤与瓦斯突出强度能量评价模型[J].煤炭学报,2012,37(9):1547-1552.
LI Chengwu,XIE Beijing,CAO Jialin,et al. The energy evaluation model of coal and gas outburst intensity[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(9):1547-1552.

[15] 王刚,武猛猛,程卫民,等.煤与瓦斯突出能量条件及突出强度影响因素分析[J].岩土力学,2015,36(10):2974-2982.
WANG Gang,WU Mengmeng,CHENG Weimin,et al. Analysis of energy conditions for coal and gas outburst and factors influencing outburst intensity[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(10):2974-2982.

(下转第15页)

71-77.
[30] 胡小娟,李文平,曹丁涛,等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报,2012,37(4):613-620.
HU Xiaojuan,LI Wenping,CAO Dingtao,et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):613-620.
[31] 邱梅,许高瑞,宋光耀,等. PCA-WNN 模型在导水裂隙带高度预测中的应用研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(6):27-36.
QIU Mei, XU Gaorui, SONG Guangyao, et al. Research on application of PCA-WNN model in predicting the development height of water-flowing fractured zones[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2023,42(6):27-36.
[32] 王旭,尹尚先,徐斌,等. 综采工作条件下覆岩导水裂隙带高度预测模型优化[J]. 煤炭科学技术,2023,51(增刊1):284-297.
WANG Xu,YIN Shangxian,XU Bin,et al. Optimization of height prediction model of water-conducting fracture zone in overlying strata under fully mechanized mining conditions[J]. Coal Science and Technology,2023,51(S1):284-297.
[33] 李博,吴煌,李腾. 基于加权的综采导水裂隙带高度多元非线性回归预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(3):536-545.
LI Bo,WU Huang,LI Teng. Height prediction of water-conducting fractured zone under fully mechanized mining based on weighted multivariate nonlinear regression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(3):536-545.
[34] 徐树媛,张永波,孙灏东,等. 基于 RBF 核 ε-SVR 的导水裂隙带高度预测模型研究[J]. 安全与环境学报,2021,21(5):2022-2029.
XU Shuyuan, ZHANG Yongbo, SUN Haodong, et al. Predictable testing and determination of the height of the fractured waterconducting zone based on the ε-SVR model via the RBF kernel function[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(5):2022-2029.
[35] 娄高中,谭毅. 基于 PSO-BP 神经网络的导水裂隙带高度预测[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(4):198-204.
LOU Gaozhong,TAN Yi. Prediction of the height of water flowing fractured zone based on PSO-BP neural network[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(4):198-204.
[36] 林海飞,周捷,高帆,等. 基于特征选择和机器学习融合的煤层瓦斯含量预测[J]. 煤炭科学技术,2021,49(5):44-51.
LIN Haifei,ZHOU Jie,GAO Fan,et al. Coal seam gas content prediction based on fusion of feature selection and machine learning[J]. Coal Science and Technology,2021,49(5):44-51.
[37] 赵厚翔,沈晓东,吕林,等. 基于 GAN 的负荷数据修复及其在 EV 短期负荷预测中的应用[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):143-151.
ZHAO Houxiang, SHEN Xiaodong, LYU Lin, et al. Load data restoration based on generative adversarial network and its application in short-term load forecasting of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(16):143-151.
[38] 姚迎乐,李建,孙滨. 拟合化处理不完整数据缺失序列插补算法仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(1):523-527.
YAO Yingle, LI Jian, SUN Bin. Simulation of interpolation algorithm for fitting incomplete data missing sequences[J]. Computer Simulation,2023,40(1):523-527.

(责任编辑:陈玉涛)

(上接第7页)

[16] 唐巨鹏,于宁,陈帅.瓦斯压力对煤与瓦斯射流突出能量的影响[J].安全与环境学报,2017,17(3):943-948.
TANG Jupeng,YU Ning,CHEN Shuai. Impact of the gas pressure on the jet outburst energy of coal and gas[J]. Journal of Safety and Environment,2017,17(3):943-948.
[17] 金侃.煤与瓦斯突出过程中高压粉煤—瓦斯两相流形成机制及致灾特征研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
[18] 张超林,许江,彭守建,等.煤与瓦斯突出物理模拟实验研究进展及展望[J].煤田地质与勘探,2018,46(4):28-34.
ZHANG Chaolin,XU Jiang,PENG Shoujian,et al. Advances and prospects in physical simulation of coal and gas outburst[J]. Coal Geology & Exploration,2018,46(4):28-34.
[19] 胡千庭,文光才.煤与瓦斯突出力学作用机理[M].北京:科学出版社,2012.
[20] TU Q Y,XUE S,CHENG Y P,et al. Experimental study on the guiding effect of tectonic coal for coal and gas outburst[J]. Fuel,2022,309:122087.
[21] CAO J,HU Q T,DAI L C,et al. Experimental study on the transporting and crushing effect of gas on coal powder during the develop stage of coal and gas outburst in roadway[J]. Scientific Reports,2023,13:18792.
[22] LI C W, HAO M, GENG Z Y, et al. Drop-weight impact fragmentation of gas-containing coal particles[J]. Particuology,2021,55:35-42.
[23] 蔡成功,熊亚选.突出危险煤破碎功理论与实验研究[J].煤炭学报,2005,30(1):63-66.
CAI Chenggong, XIONG Yaxuan. Theoretical and experimental study on crushing energy of outburst-proneness coal[J]. Journal of China Coal Society,2005,30(1):63-66.
[24] 孙东玲,曹偈,熊云威,等.突出过程中煤—瓦斯两相流运移规律的实验研究[J].矿业安全与环保,2017,44(2):26-30.
SUN Dongling,CAO Jie,XIONG Yunwei,et al. Experimental study on migration rule of coal-gas flow in process of outburst[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2017,44(2):26-30.
[25] 孙东玲,曹偈,苗法田,等.突出煤-瓦斯在巷道内的运移规律[J].煤炭学报,2018,43(10):2773-2779.
SUN Dongling, CAO Jie, MIAO Fatian, et al. Migration law of outburst coal and gas in roadway[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(10):2773-2779.

(责任编辑:陈玉涛)